

**INGENIERÍA DE PROCESOS APLICADA A LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL
USANDO EL RECHAZO DE BANANO DE LA ZONA DE URABÁ**

Daniel Andrés Flórez Alvarado
Adriana Elizabeth Lara Sandoval

Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Facultad de Ingeniería Escuela de Ciencias Básicas,
Tecnología e Ingeniería
Colombia
2014

**INGENIERÍA DE PROCESOS APLICADA A LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL
USANDO EL RECHAZO DE BANANO DE LA ZONA DE URABÁ**

Daniel Andrés Flórez Alvarado

Cód. 71.314.374

Adriana Elizabeth Lara Sandoval

Cód. 1.052.379.248

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Especialista en Ingeniería de Procesos en Alimentos y Biomateriales

Director:

Víctor Jairo Fonseca Vigoya I.Q.

Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Facultad de Ingeniería Escuela de Ciencias Básicas,
Tecnología e Ingeniería
Colombia
2014

INGENIERÍA DE PROCESOS APLICADA A LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL USANDO EL RECHAZO DE BANANO DE LA ZONA DE URABÁ

RESUMEN

La mayoría de los países ya sea económicamente avanzados o en diferentes etapas de desarrollo se enfrentan con el problema de la eliminación y el tratamiento de los desechos y residuos orgánicos; éstos pueden ser tratados de diferentes maneras por ejemplo mediante la reducción de su volumen o por procesamiento en alguna sustancia útil utilizando los procesos fisicoquímicos de transformación del banano en bioetanol y analizando los impactos ambientales para cumplir con las normas sanitarias.

El objetivo de este estudio fué evaluar el potencial de producción de etanol a partir de banano y el estudio y aplicación de la ingeniería de procesos en la obtención de etanol utilizando banano de rechazo como materia prima en la región de Urabá.

El bioetanol se obtuvo a través de la fermentación y destilación del banano de rechazo donde los resultados se plasman en los controles operacionales y en la hoja patrón obtenida en la estandarización del proceso.

Palabras clave: Bioetanol, banano, fermentación, destilación y mosto.

ABSTRACT

Most countries either financially or in advanced stages of development are faced with the problem of disposal and treatment of waste and organic waste; these can be treated in different ways, for example by reducing its volume or processing any useful substance using physicochemical transformation processes bananas in bioethanol and analyzing environmental impacts to meet sanitary standards.

The aim of this study was to evaluate the potential for ethanol production from banana and the study and application of process engineering in ethanol production using banana rejection as feedstock in the region of Urabá.

Bioethanol is obtained by fermentation and distillation of rejected bananas where the results are reflected in the operational controls and leaf pattern obtained in the standardization process.

Keywords: Bioethanol, bananas, fermentation, distillation and must.

CONTENIDO

1. EL PROBLEMA	7
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.2. JUSTIFICACIÓN	11
1.4 OBJETIVOS	14
1.4.1 Objetivo general	14
1.4.2 Objetivos específicos	14
2. MARCO TEÓRICO	15
2.1. Biocombustibles	16
2.1.1. Bioetanol	18
2.1.2. BIOCOMBUSTIBLE E5	20
2.1.3. BIOCOMBUSTIBLE E10	20
2.1.4. BIOCOMBUSTIBLE E85	20
2.1.5. BIOCOMBUSTIBLES E95 y E100	20
2.2. PRODUCTORES DE ETANOL	21
2.3. SUBPRODUCTOS DE LA OBTENCIÓN DEL BIOETANOL	21
2.3.1 Materiales Lignocelúlicos	21
2.3.2. Materiales alimenticios	22
2.4. BALANCE ENERGÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL	22
2.5 PROCESOS DE OBTENCION DEL BIOETANOL	24
2.5.1 Marco Referencial	24
2.5.2 Banano	28
2.5.3 Hidrólisis	30
2.5.4 Fermentación	31
2.5.5 Destilación	32
2.6 USOS	33
2.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS	34
2.7.1 Ventajas	34
2.7.2 Desventajas	35
2.8 IMPACTO AMBIENTAL	35
2.9 HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	36
2.9.1 Formulación de la Hipótesis	36

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	37
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	37
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA	37
3.3. DISEÑO DEL PROCEDIMIENTO	37
4. RESULTADOS	39
4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO (CAMPO)	39
4.2. RELACIÓN DE EQUIPOS Y MATERIA PRIMA (CAMPO)	40
4.3. CRONOGRAMA DE OPERACIONES (CAMPO)	40
4.4. CRONOGRAMA DE VARIABLES (CAMPO)	43
4.5. ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO	48
4.5.1. Diagramas de flujo	48
4.5.2. Balance parcial de materiales para la obtención de bioetanol	50
4.5.3. Cronograma global del proceso.	52
4.5.4. Hoja de proceso.	53
5. CONCLUSIONES	54
6. RECOMENDACIONES	55
BIBLIOGRAFÍA	56
ANEXOS	63
(Imágenes de los ensayos de campo)	63
Imagen 1. Muestreo.	63
Imagen 2. Preparación de la muestra, pesaje banano.	63
Imagen 3. Preparación de la muestra, pesaje levadura.	63
Imagen 4. Preparación de la muestra, licuado.	64
Imagen 5. Preparación de la muestra, regulación de °Brix.	64
Imagen 6. Preparación de la muestra, regulación de pH.	64
Imagen 7. Preparación de la muestra, biorreactor.	65
Imagen 8. Fermentación, ambiente.	65
Imagen 9. Colado.	65
Imagen 10. Destilación.	66
Imagen 11. Identificación del bioetanol.	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales Productores de Etanol 2005.....	20
Tabla 2. Análisis de banano verde: pulpa y cáscara (% base húmeda).....	28
Tabla 3. Análisis bromatológico banano verde cavendish valery.....	28
Tabla 4. Resultados experimentales (campo).....	41
Tabla 5. Balance de materiales (campo).....	41
Tabla 6. Cronograma de operaciones (campo).....	43
Tabla 7. Cronograma de variables (campo).....	43
Tabla 8. Variables críticas.....	44
Tabla 9. Estadísticas de la regresión Y2.....	45
Tabla 10. Anova Y2.....	45
Tabla 11. Análisis de residuales Y2.....	46
Tabla 12. Estadísticas de la regresión Y1.....	46
Tabla 13. Anova Y1.....	47
Tabla 14. Análisis de residuales Y1.....	47
Tabla 15. Equipos.....	50
Tabla 16. Balance parcial global.....	51
Tabla 17. Cronograma global del proceso de obtención del bioetanol.....	52
Tabla 18. Hoja de proceso.....	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfica 1. Proceso de Producción de Bioetanol.....	24
Gráfica 2. Procesamiento de Diferentes Materias Primas.....	25
Gráfica 3. Proceso de fermentación.....	42
Gráfica 4. Relación de volúmenes.....	42
Gráfica 5. P&ID.....	49
Gráfica 6. Diagrama elemental del proceso.....	50

1. EL PROBLEMA

"La producción de etanol a partir de cereales y caña de azúcar carece de soluciones económicas competitivas y ha contribuido al incremento del costo de los alimentos. Por otro lado, según Uyazán (2004) en el mundo se producen aproximadamente 1600 millones de toneladas por año de residuos sólidos, los cuales generan graves problemas, no sólo por el deterioro progresivo del medio ambiente, sino también desde el punto de vista económico puesto que los costos de recolección, transporte y disposición final son cada vez mayores" (Alvear *et, al*, 2009).

"En el caso de Colombia, las cifras del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial indican que en un día el país produce 27300 toneladas de basura de las cuales el 65% son residuos orgánicos entre los cuales se encuentran los de subproductos y de rechazo agrícolas" (Tejada *et, al* 2010). Estas son sólo algunas de las causas por las cuales se está impulsando el estudio de la producción de bioetanol de tercera generación, producido a partir de biomasa lignocelulósica residual, compuesta de acuerdo a Olsson & Hahn-Hiigerdl (1996) por dos polímeros de carbohidratos, la celulosa (35-50%) y la hemicelulosa (15-25%), y un polímero fenólico, la lignina (20-25%). (Alvear *et, al*, 2009).

"La producción de banano de exportación (variedad *Cavendish valery*) desató un problema ambiental, dadas las exigencias en el control de calidad que acarrearón rechazos de fruta entre 20% y 25% v/v" (Afanador, 2005). Estos rechazos han sido objeto de manipulación incontrolada, como la costumbre de disponerlos a cielo abierto y en botaderos no autorizados (Afanador, 2002). "Su degradación natural genera gases tóxicos y de efecto invernadero, atracción de vectores y producción de lixiviados que arremeten contra la calidad hídrica superficial y subterránea y la calidad de los suelos. " (Góngora, 2011)

Este problema ha sido estudiado por múltiples investigadores, quienes proponen el aprovechamiento de la fruta en la alimentación animal, el compostaje y la producción de almidón y etanol (Afanador, 2005). "En 1982, Saldarriaga estudió la fruta como fuente para producir etanol y concluyó que el volumen disponible de banano de rechazo era suficiente para alimentar una planta de 35.000-40.000 L/d de alcohol combustible. Por lo tanto, recomendó el montaje de una planta de pequeña capacidad en la cual se pudiera adelantar investigación sobre los procesos de conversión del banano de rechazo en alcohol (Ibíd.)." (Afanador, 2005)

En efecto, en 1987, se puso en marcha una planta piloto en Currulao (corregimiento de Turbo); los experimentos determinaron que el almidón del banano se convertía totalmente en azúcar cuando se operaba en rangos de temperatura de 135°C-185°C, presión de 1,21 MPa-2,93 MPa, y concentración de 1%-3% de HCl (Saldarriaga, 1982). "En lo sucesivo los ensayos se enfocarían en encontrar las ventajas y desventajas de este proceso y mejoras técnicas para un proceso más eficiente." (Afanador, 2005).

"El banano es una materia prima apta para la obtención de bioetanol. Presenta un alto contenido de carbohidratos (aproximadamente 20% de su peso) aptos para procesos fermentativos encaminados a la producción de alcohol lo cual constituye una característica importante que converge con el hecho de que en el país se generan cada año aproximadamente 800 mil toneladas de banano de rechazo y material lignocelulósico derivado del proceso (vástago y pseudotallo)." (Zapata, 2010).

Actualmente una tercera parte de la fruta que no se exporta (rechazo) se destina al consumo interno, otra tercera parte se emplea como materia prima en la producción de fertilizantes orgánicos (compost) para el cultivo de la misma fruta, y una tercera parte continúa considerándose como residuo. Son precisamente estos últimos dos tercios del residuo los que potencialmente se pueden usar en procesos de fermentación alcohólica. (Zapata, 2010).

"La producción de bioetanol se realiza mediante un proceso fermentativo en el cual se utilizan microorganismos capaces de convertir el azúcar en etanol. Usando levaduras *S. cerevisiae* para la producción de etanol en fermentaciones tradicionales en *batch*, la productividad está limitada entre 1.8 a 2.3 g/Lh." (Zapata, 2010).

"Las estrategias para la retención celular incluyen la separación en la corriente de producto, seguida de un reciclo al fermentador o inmovilización dentro del fermentador." (Zapata, 2010). Esta última técnica ha sido previamente estudiada debido a los beneficios que presenta comparada con los procesos con células libres, ya que ayuda a mantener la actividad enzimática garantizando una buena actividad celular durante la fermentación, de modo que permite tener una reducción de los tiempos de proceso, entre otras ventajas (Zapata, 2010).

En este trabajo se realiza una breve descripción del estado del conocimiento y aplicación de la ingeniería de procesos en el diseño de una planta para la obtención de bioetanol a partir de banano de rechazo mediante un análisis comparativo de los estudios sobre el aprovechamiento de esta fruta en Urabá. Se contempla la disponibilidad como materia prima, los procesos fisicoquímicos de transformación del banano en bioetanol y los impactos ambientales potenciales de esta industria.

Se planteó la necesidad de evaluar la producción por cochadas de etanol, ya que de acuerdo con lo reportado en la literatura, esta forma de operación permite obtener altos rendimientos y presenta ventajas operativas como la recuperación celular y la estabilidad de los procesos. Es por ello que se propone implementar un proceso de producción por cochadas para la producción de etanol empleando levadura y mosto a partir de banano. (Zapata, 2010).

"En las últimas décadas, la utilización de procesos biotecnológicos para la obtención de bienes y servicios se ha convertido en una gran alternativa que

ofrece soluciones a problemas provenientes de la aplicación de tecnologías tradicionales. En Colombia se están obteniendo avances tecnológicos y productivos importantes en la aplicación de la biotecnología en cuanto a la producción de biocombustibles se refiere" (Zapata, 2010).

La producción de bioetanol se realiza mediante un proceso fermentativo en el cual se utilizan microorganismos capaces de convertir el azúcar en etanol. Usando levaduras *S. cerevisiae* para la producción de etanol en fermentaciones tradicionales en *batch*, la productividad está limitada entre 1.8 a 2.3 g/Lh, la cual es baja y resulta costosa para la producción de biocombustible, (Zapata, 2010). Sin embargo, el uso de fermentaciones en continuo puede duplicar dicha productividad y más aún, si se utiliza retención celular, tal como en el caso de Brasil, en donde centrifugaciones continuas son usadas para reciclar biomasa (Zapata, 2010).

El banano es una materia prima apta para la obtención de bioetanol. Presenta un alto contenido de carbohidratos aptos para procesos fermentativos encaminados a la producción de alcohol lo cual constituye una característica importante que converge con el hecho de que en el país se generan cada año aproximadamente 800 mil toneladas de banano de rechazo que no está siendo aprovechado al máximo ya que se utiliza únicamente para compostaje en la región de Urabá, (Zapata, 2010).

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con las anteriores circunstancias puede plantear el problema:

¿Cómo contribuye al aprovechamiento de los residuos de cultivo de banano en Urabá la aplicación de la ingeniería de procesos en la obtención de bioetanol usando el rechazo como materia prima?

1.2. JUSTIFICACIÓN

Colombia al ser un país tropical tiene la posibilidad de utilizar sus tierras para el cultivo de productos vegetales para la producción de biocombustibles como el biodiesel y el etanol. Urabá goza de condiciones climáticas excepcionales para la producción del banano debido a que la riqueza de su suelo, ha permitido que la región se convierta en un productor agrícola de excelente calidad, ya que esta fruta se encuentra disponible todo el año.

"El banano es uno de los productos propuestos por el Ministerio de Agricultura con proyección al incremento en las exportaciones entre los años 2006 – 2020, de tal forma, que se ha propuesto una estrategia de nuevos mercados que representen mayores oportunidades de desarrollo y retos de modernización, para lo cual se requiere desarrollar sistemas preventivos, adopción y certificación de manejo integrado de plagas y buenas prácticas agrícolas" (Colombia Componente Proyectos Demostrativos Cultivos Seleccionados).

"Los departamentos exportadores de este producto, son Antioquia con una participación del 72,1% y Magdalena 27,9%, de la producción nacional. En el año 2007 las exportaciones colombianas de banano, ascendieron a 85.5 millones de cajas de 18.14 Kg. por valor de US\$509.6 millones. Se presentaron crecimientos de 2.04% en volumen y de 10.09% en valor, respecto al año 2006, cuando se exportaron desde Colombia 83.8 millones de cajas por valor de US\$462.9 millones. Las hectáreas sembradas de banano en Colombia en el 2007, ascendieron a 42,287; 827 hectáreas menos que las reportadas en el año 2006, cuando fueron 43,654 las hectáreas sembradas de banano de exportación en las dos zonas productoras del país, (Urabá y Magdalena)" (Colombia Componente Proyectos Demostrativos Cultivos Seleccionados).

"Muchos bananeros están implementando sistemas de compostaje de este banano de desecho para devolverlo a las fincas en forma de abono orgánico.

El concepto es bueno. El gremio necesita sin embargo mejorar estas plantas de "compostaje", lo que se puede conseguir optimizando el sistema tecnológico" (Desarrollo regional en Uraba, Colombia, 2011).

El tratamiento de los desechos agroindustriales es una problemática mundial debido a la emisión de contaminantes de sólidos, líquidos y gaseosos. Una alternativa de disposición final de los desechos que permite tener un producto sanitizado, con aplicaciones agrícolas es la implementación de procesos fermentativos para dichos sustratos que permiten recuperar sustancias como metano y alcohol etílico, convirtiéndose en una buena fuente de energía alternativa. El banano de rechazo rico en almidón, puede ser utilizado como sustrato para procesos fermentativos que permitan el máximo aprovechamiento energético a través de la generación de bioetanol (Bastidas, et, al 2010).

El rendimiento de bioetanol a partir de banano es más alto que en la mayoría de otros productos agrícolas. Los bananos de desecho son tratados como residuo y, como tal, representa una materia prima de muy bajo costo; ellos fermentan muy bien y tienen una alta concentración de carbohidratos.

"La producción de etanol a partir del banano rechazado es una tendencia muy bien aprovechada ya que es una tendencia ecológica a frenar la contaminación producida por los combustibles fósiles por utilización de este alcohol. Esta producción se hará sin desabastecer el ámbito alimenticio y de comercialización interna del banano" (Bastidas, et, al 2010).

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Aplicar la ingeniería de procesos en la estandarización del proceso previo al diseño de una planta de obtención de bioetanol a partir del banano de rechazo de la región de Urabá.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar los procesos necesarios para la transformación de la biomasa.
- Realizar las pruebas de campo y experimentación.
- Estandarizar el sistema aplicando los siguientes pasos: Descripción del proceso, relación de equipos y materia prima, cronogramas de operaciones (etapas y procesos), cronograma de variables, elaboración de la hoja de proceso.
- Analizar los resultados obtenidos.

2. MARCO TEÓRICO

El etanol, o alcohol etílico, es una sustancia con formula molecular C_2H_6O , que puede ser utilizada como combustible en motores de combustión interna con ignición a chispa de dos maneras, básicamente: 1) en mezclas de gasolina y etanol anhidro; o 2) como etanol puro, generalmente hidratado (Austin, G. T. 1993).

La biomasa ha sido una fuente esencial para el hombre; con la llegada de los combustibles fósiles, este recurso energético perdió importancia en el mundo industrial. En la actualidad está adquiriendo una mayor importancia, principalmente por los biocombustibles (Vicente G., et, al 2001).

La biomasa es toda sustancia orgánica renovable de origen tanto animal como vegetal, la energía de la biomasa proviene de la energía que almacenan los seres vivos. En primer lugar los vegetales realizan la fotosíntesis en donde utilizan la energía del sol para formar sustancias orgánicas. Después los animales incorporan y transforman esa energía al alimentarse de las plantas. Los productos de dicha transformación que se consideran residuos, pueden ser utilizados como recurso energético (Velásquez, H. 2010).

Existen diferentes tipos de biomasa que pueden ser utilizados como recurso energético. Aunque se pueden hacer multitud de clasificaciones, en esta monografía se ha escogido la clasificación más aceptada, la cual divide la biomasa en cuatro tipos diferentes: biomasa natural, residual seca y húmeda y los cultivos energéticos (Tejada *et, al* 2010).

La biomasa no emite contaminantes sulfurados o nitrogenados, ni partículas sólidas; por el contrario si se utilizan residuos de otras actividades como biomasa esto se traduce en un reciclaje y disminución de residuos. Canaliza por tanto los excedentes agrícolas alimentarios (Cruz, k. et, al. 2004).

No hay otra opción sostenible para la producción de combustibles para el transporte que puede igualar el etanol producido a partir de biomasa lignocelulósica con respecto a la gran ventaja ambiental, económica y de infraestructura.

La región favorable para la producción industrial de bioetanol debe tener excedente de biomasa que no afectaría a la seguridad alimentaria.

La gran variedad de biomasa existentes unida al desarrollo de distintas tecnologías de transformación de ésta en energía como la combustión directa, pirólisis, gasificación, fermentación, digestión anaerobia entre otras, permiten plantear una gran cantidad de posibles aplicaciones entre las que se destacan la producción de energía térmica, electricidad, gases combustibles y biocombustibles (Fuentes, 1994).

2.1. Biocombustibles

Los biocombustibles son aquellos combustibles producidos a partir de la biomasa y que son considerados, por tanto, una energía renovable. Se pueden presentar tanto en forma sólida (residuos vegetales, fracción biodegradable de los residuos urbanos o industriales) como líquida (bioalcoholes, biodiésel) y gaseosa (biogás, hidrógeno). Dentro de los biocombustibles, los biocarburantes abarcan al subgrupo caracterizado por la posibilidad de su aplicación a los actuales motores de combustión interna (motores diésel y Otto). Son, en general, de naturaleza líquida (García et al. 2006).

Los biocarburantes en uso proceden de materias primas vegetales, a través de transformaciones biológicas y físico-químicas. Actualmente se encuentran desarrollados principalmente dos tipos: el biodiésel, obtenido a partir de la transesterificación de aceites vegetales y grasas animales con un alcohol ligero, como metanol o etanol; y el bioetanol, obtenido fundamentalmente de semillas ricas en azúcares mediante fermentación (Meher L.C et al, 2006).

Con la caña de azúcar, la remolacha o el sorgo dulce, que contienen azúcares simples, se obtiene etanol por fermentación. Sin embargo, en otros cultivos, como los cereales o las batatas, la energía está almacenada en forma de carbohidratos más complejos como el almidón, que tiene que ser hidrolizado antes de su fermentación a bioetanol (Núñez G., J. y P. García T. 2006). Por su parte, hay que destacar el etil-tercbutil éter (ETBE) producido a partir del bioetanol, ya que su utilización en motores presenta menos problemas que el propio bioetanol. En España, por ejemplo, todo el bioetanol se transforma en ETBE en las refinerías de petróleo siendo utilizado como aditivo de las gasolinas. La producción de todos estos combustibles está sujeta a amplias necesidades de terreno en el cultivo de sus materias primas (MacLean H., Lave L., 2003).

Los Biocombustibles desarrollados a partir de estos productos, pueden ser utilizados en los motores convencionales sin cambios de consideración, ya que solamente, y debido a su poder diluyente, solo requieren de ser necesario el reemplazo de las mangueras de conducción del combustible por elementos no fabricados sobre la base de caucho o espuma de poliuretano (Masera C., O. et, al. 2006).

Los biocombustibles emiten casi la misma cantidad de Dióxido de Carbono que los combustibles fósiles, pero a diferencia de estos últimos, el mismo es vuelto a fijar por la masa vegetal a través del proceso de la fotosíntesis. De esta forma se produce un "ciclo de carbono", que hace que el CO₂ quemado y liberado a la atmósfera, vuelva a ser fijado y el ciclo tenga como resultado un balance cero, en lo que a emisiones se refiere, no habiendo acumulación de gases. El ciclo descrito contrasta notoriamente con lo que sucede con la emisión de CO₂ producido por la quema de los combustibles fósiles en el cual el carbono liberado, fijado hace miles de millones de años, es quemado y vuelto a liberar, causando la acumulación de los mismos en la atmósfera, el efecto invernadero y el calentamiento global (Biocombustibles 2010).

Actualmente existe un creciente interés por los biocombustibles ecológicos sostenibles en todo el mundo debido a su contribución con el medio ambiente y a que puede originar nuevos productos.

2.1.1. Bioetanol

Se obtiene de forma natural por la fermentación de azúcares y almidones de múltiples plantas, biocombustible, combustible de origen vegetal que tiene características parecidas a las de los combustibles fósiles, lo que permite su utilización en motores apenas modificados, además no contiene azufre uno de los principales causantes de la lluvia ácida. Se obtiene por fermentación de medios azucarados extraídos a partir de caña de azúcar, remolacha, maíz, trigo, banano y cebada entre otros. Es utilizado para incrementar el octanaje y mejorar la calidad de las emisiones de la gasolina, al convertirla en un combustible oxigenado (Monsalve, et al, 2006).

El bioetanol (EtOH) es el biocombustible más utilizado en el mundo, y desde hace muchos años, como componente de la gasolina. Tras la fermentación se forma un mosto con un grado alcohólico en torno al 10%-15%, que se concentra por destilación para la obtención de alcohol hidratado (4-5% de agua) o para la consecución de alcohol absoluto (99,4% min. de riqueza), luego de un proceso específico de deshidratación. El alcohol absoluto se mezcla con gasolina en vehículos corrientes (Quintero, 2006).

El bioetanol como combustible de transporte se utiliza de diferentes formas; por ejemplo mezclado con gasolina en bajos porcentajes (menores de 5-10%), los alcoholes aumentan el contenido de oxígeno de la gasolina y con ello su octanaje; así arden mejor y mejoran las prestaciones del vehículo sin que haya que modificar los motores, al mismo tiempo que se reducen el consumo y las emisiones contaminantes. La mezcla al 10% recibe el nombre de gasohol, el bioetanol desempeña un papel de aditivo oxigenado de modo indirecto en forma de ETBE (etil-terciario-butil-éter) que se fabrica a partir de una mezcla de etanol e isobuteno, también puede mezclarse con un aditivo para mejorar la ignición en motores diésel configurados para ese propósito (Vicente G., et al., 2001).

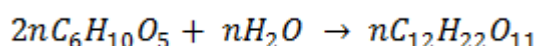
El bioetanol es el biocarburante más utilizado; en 2004 se produjeron en el mundo alrededor de 30.000 millones de litros de bioetanol para combustible, lo que representa un 2% del consumo mundial de petróleo (Vicente G., et al, 2001).

Hay tres principales caminos para producir bioetanol o alcohol etílico a partir de materiales biológicos; todos ellos incluyen una primera fase de fermentación por levaduras seguida de una posterior destilación mediante la aplicación de calor. la duración de cada sistema es distinta, así como la producción de alcohol y su coste, dependiendo del elemento inicial, que puede ser un producto azucarado, almidón o material celulósico (Uyazan , I.D. et al, 2004).

En la tendencia actual, el etanol producido a partir de biomasa es el biocombustible más utilizado cuando se mezcla con la gasolina.

Químicamente la obtención de etanol mediante fermentación se realiza mediante tres procesos que son:

1. Conversión enzimática del almidón en azúcar: en donde ocurre la hidrólisis del almidón (Aycachi, 2009):

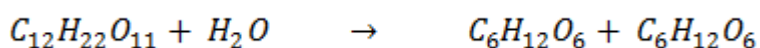


(almidón) α -amilasa (maltosa)

y la sacarificación

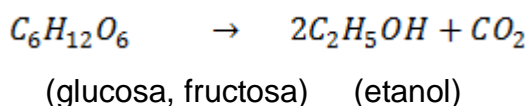


(maltosa) glucoamilasa (glucosa)



(sacarosa) invertasa (glucosa) (fructosa)

2. Fermentación; la levadura se añade a la mezcla para convertir los monosacáridos en etanol (8-12%) y CO₂. Se añaden 450 g de levadura por cada 1.000 litros de mezcla (Aycachi, 2009):



3. Destilación; donde el etanol se separa.

2.1.2. BIOCOMBUSTIBLE E5

"Mezcla del 5% de bioetanol y el 95% de Gasolina normal. Esta es la mezcla habitual y mezcla máxima autorizada en la actualidad por la regulación europea, sin embargo, es previsible una modificación de la normativa europea que aumentará este límite al 10% (E10) ya que diferentes estudios constatan que los vehículos actuales toleran sin problemas mezclas hasta el 10% de Bioetanol y los beneficios para el medioambiente son significativos." (Castilla, 2010).

2.1.3. BIOCOMBUSTIBLE E10

"Mezcla del 10% de Bioetanol y el 90% de Gasolina normal. Esta mezcla es la más utilizada en Estados Unidos, ya que hasta esta proporción de mezcla los motores de los vehículos no requieren ninguna modificación y e incluso produce la elevación del octano en la gasolina mejorando su resultado y obteniendo una notable reducción en la emisión de gases contaminantes." (Peralta et al, 2010).

2.1.4. BIOCOMBUSTIBLE E85

"Mezcla de 85% de bioetanol y 15 % de gasolina, utilizada en vehículos con motores especiales. En Estados Unidos las marcas más conocidas ofrecen vehículos adaptados a estas mezclas. También se comercializan, en algunos países (Estados Unidos, Brasil, Suecia) los llamados vehículos FFV (Flexible Fuel Vehicles) o Vehículos de Combustibles Flexibles con motores adaptados que permiten una variedad de mezclas" (Peralta et al, 2010).

2.1.5. BIOCOMBUSTIBLES E95 y E100

"Mezclas hasta el 95% y 100% de bioetanol son utilizados en algunos países como Brasil con motores especiales" (Peralta et al, 2010).

Por su parte, hay que destacar el etil-tercbutil éter (ETBE) producido a partir del bioetanol, ya que su utilización en motores presenta menos problemas que el propio bioetanol (Núñez G., J., 2006).

La producción de etanol se ha convertido en un verdadero "boom" a nivel mundial. En efecto, la producción de etanol creció un 19% en 2005, alcanzando 36,5 mil millones de litros (Meriches, 2006).

2.2. PRODUCTORES DE ETANOL

Tabla 1 Principales Productores de Etanol 2005.

	Producción (millones de Lts)
Brasil	16.500
USA	16.230
China	2.000
Unión Europea	950
India	300

Fuente: (Poniachik 2007).

2.3. SUBPRODUCTOS DE LA OBTENCIÓN DEL BIOETANOL:

"Los subproductos generados en la producción de bioetanol, así como el volumen de los mismos, dependen en parte de la materia prima utilizada. En general se pueden agrupar en dos tipos" (Peralta, 2010):

2.3.1 Materiales Lignocelúlicos:

"Tallos, bagazo, etc., correspondientes a las partes estructurales de la planta. En general se utilizan para valorización energética en cogeneración, especialmente para cubrir las necesidades energéticas de la fase de

destilación del bioetanol, aunque también se puede vender el excedente a la red eléctrica (con precio primado)" (Peralta, 2010).

2.3.2. Materiales alimenticios:

Pulpa y granos de destilería desecados con solubles (DDGS), que son los restos energéticos de la planta después de la fermentación y destilación del bioetanol; tienen interés para el mercado de piensos animales por su riqueza en proteína y valor energético (Cruz, k. et al, 2004).

La caña de azúcar es la planta más aprovechable por el bagazo generado para su combustión y generación energética, la remolacha azucarera genera por su parte unas 0.75 ton de pulpa por tonelada de bioetanol producido (Fajardo C., 2007).

La producción de bioetanol a partir de trigo o maíz genera en torno a 1,2 ton de DDGS por tonelada de bioetanol (Fajardo C., 2007).

2.4. BALANCE ENERGÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

Para que el etanol contribuya perceptiblemente a las necesidades de combustible para el transporte, necesitaría tener un balance energético neto positivo, para evaluar la energía neta del etanol hay que considerar cuatro variables: la cantidad de energía contenida en el producto final del etanol, la cantidad de energía consumida directamente para hacer el etanol, la cantidad del etanol resultante comparado con la calidad de la gasolina refinada y la energía consumida indirectamente para hacer la planta de proceso de etanol (Bullock, J., 1998).

Dependiendo del estudio, la energía neta varía de 0.7 a 1.5 unidades de etanol por unidad de energía de combustible fósil consumida (Guevara *et al*, 2008); para comparar el balance energético de la producción de la gasolina a la producción del etanol, debe calcularse también la energía requerida para producir el petróleo de la atmósfera y para meterlo nuevamente dentro de la tierra, un proceso que haría que la eficiencia de la producción de la

gasolina fuese fraccionaria comparada a la del etanol. Se calcula que se necesita un balance energético de 200% o 2 unidades de etanol por unidad de combustible fósil invertida, antes de que la producción en masa del etanol llegue a ser económicamente factible (Guevara *et al*, 2008).

Las dos principales barreras para el uso de bioetanol son:

- Afinidad con el agua:

Los sistemas de transporte y almacenamiento deben estar totalmente libres de agua. Incluso pequeñas cantidades de agua en las mezclas etanol-gasolina pueden producir su separación en dos fases, lo que reduce el rendimiento del motor. El etanol puede actuar como un disolvente que facilita la incorporación de agua a las mezclas de etanol-gasolina. El agua se puede almacenar en pequeñas cavidades de los sistemas con hidrocarburos, tales como cañerías, depósitos o sistemas de alimentación. Esta agua, a menudo, contiene impurezas que normalmente no ocasionan problemas debido a que no se mezcla con los combustibles y se pueden drenar periódicamente. La mezcla de gasolina con etanol puede arrastrar este agua e incorporarlo al combustible (Bullock, J., 1998).

- Presión de vapor:

Aunque el etanol tiene una relativamente baja presión de vapor, cuando se utiliza como aditivo de la gasolina su presión de vapor efectiva es muy alta, llegando a un valor RVP (Reid Vapor Pressure) de 18 psi (124 KPa), lo cual representa una desventaja para su uso. Cuando el etanol se añade a una gasolina formulada adecuadamente, los hidrocarburos con bajo punto de ebullición, como butanos o incluso pentanos, deben ser reducidos para cumplir con las especificaciones de presión de vapor (Leveau, J., 2000).

Valores bajos de presión de vapor reducen las emisiones debidas a la evaporación, en los procesos de llenado de los tanques y almacenamiento del combustible. Debido a estos beneficios ambientales es de esperar que las especificaciones de este parámetro sigan manteniéndose bajas. En algunos casos, para cumplir especificaciones, es necesario eliminar también el pentano. Esto supone un encarecimiento del proceso de producción de

mezclas de etanol y gasolina, por lo que las compañías consideran impracticable reducir más la presión de vapor (Monyem, 2001).

2.5 PROCESOS DE OBTENCION DEL BIOETANOL

2.5.1 Marco Referencial

El etanol se puede obtener de plantas ricas en azúcar (en Colombia principalmente la caña de azúcar de la que se obtiene la melaza que es la principal materia prima azucarada para la producción de etanol, también se encuentran productos secundarios como la remolacha y el banano) y granos ricos en almidón, como el maíz, arroz, trigo y cebada son las materias primas más comunes para la producción de etanol (Saldarriaga, L. C.1982).

El bioetanol se obtiene por fermentación de medios azucarados hasta lograr un grado alcohólico, después de fermentación, se logra una concentración de etanol del 10-15% (en peso), purificándose por destilación para la obtención del "alcohol hidratado" o llegar hasta el alcohol absoluto tras un proceso específico de deshidratación. Esta última calidad es la necesaria para utilizar el alcohol en mezclas con gasolina en vehículos convencionales (Ramil, M. y Valverde, J. 2002).

Principalmente se utilizan tres familias de productos para la obtención del alcohol: Azúcares, procedentes de la caña o la remolacha, por ejemplo.

Cereales, mediante la fermentación de los azúcares del almidón.

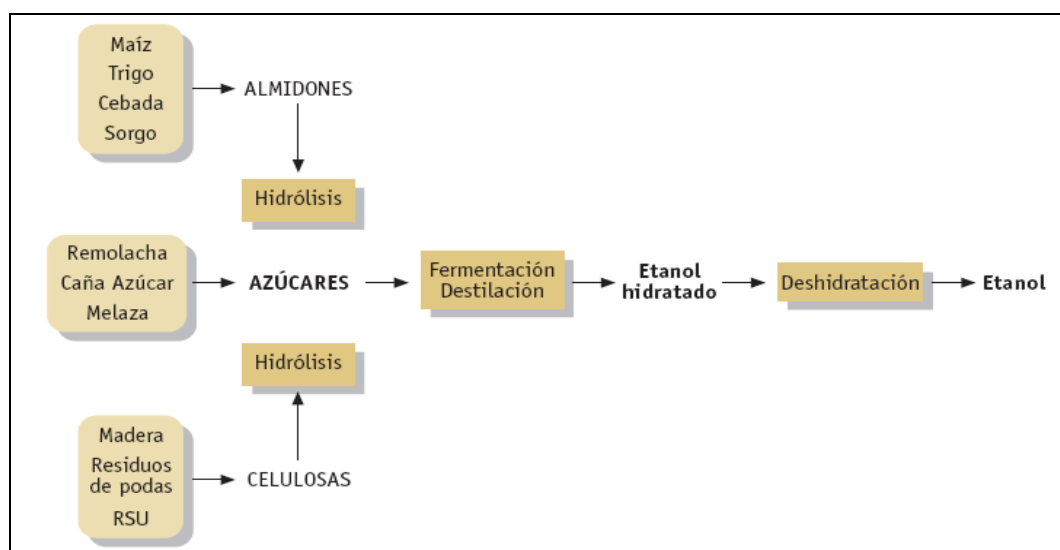
Biomasa, por la fermentación de los azúcares contenidos en la celulosa y hemicelulosa (Biocombustibles, 2008).

Los materiales lignocelulósicos son los que ofrecen un mayor potencial para la producción de bioetanol. Una gran parte de los materiales con alto contenido en celulosa, susceptibles de ser utilizados para estos fines, se generan como residuos en los procesos productivos de los sectores agrícola, forestal e industrial. Los residuos agrícolas proceden de cultivos leñosos y

herbáceos y, entre otros, hay que destacar los producidos en los cultivos de cereal (Monsalve, J. et al., 2006).

Por su parte, los residuos de origen forestal proceden de los tratamientos silvícola y de mejora o mantenimiento de los montes y masas forestales. También pueden utilizarse residuos generados en algunas industrias, como la papelera, la hortofrutícola o la fracción orgánica de residuos sólidos industriales. Muchos de estos residuos no sólo tienen valor económico en el contexto donde se generan sino que pueden ser causa de problemas ambientales durante su eliminación (Bullock, J. y Kristiansen B.1998). Los residuos de biomasa contienen mezclas complejas de carbohidratos, llamados celulosa, hemicelulosa y lignina. Para obtener los azúcares de la biomasa, esta es tratada con ácidos o enzimas que facilitan su obtención. La celulosa y hemicelulosa son hidrolizadas por enzimas o diluidas por ácidos para obtener sacarosa, que es entonces fermentada. Tres son los principales métodos para extraer estos azúcares: la hidrólisis con ácidos concentrados, la hidrólisis con ácidos diluidos y la hidrólisis enzimática (Cruz, k. et al, 2004). En la gráfica 1 se puede ver de forma esquemática, el proceso completo de obtención del alcohol, a partir de las principales materias primas que se utilizan para su producción.

Gráfica 1. Proceso de Producción de Bioetanol.

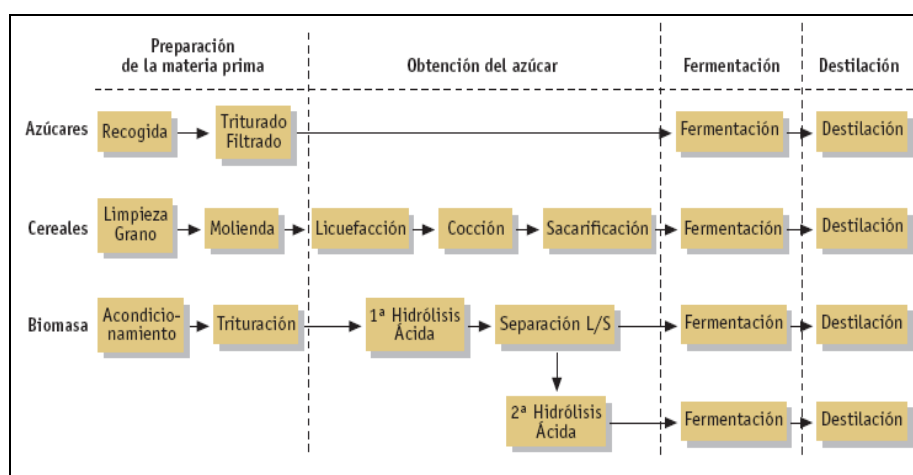


Fuente: (Poniachik 2007).

Para la purificación de este etanol producto de la fermentación se utiliza una operación unitaria conocida como destilación, consiste en la separación de los componentes de una mezcla líquida (en la que todos los compuestos presentan cierto grado de volatilidad) por evaporación y condensación sucesivas. La separación se basa en la diferencia de volatilidades absolutas de los componentes, lo que tiene como consecuencia la formación de un vapor de composición diferente a la del líquido del que procede (García C., et al, 2006).

En la gráfica 2 se pueden ver las diferentes formas de procesar las materias primas, en función de su origen, para la obtención de sus azúcares.

Gráfica 2. Procesamiento de Diferentes Materias Primas.



Fuente: (Poniachik 2007).

En Monsalve (2006), se evaluó la hidrólisis ácida del almidón presente en yuca y de la celulosa presente en cáscara de banano y su posterior fermentación a etanol, se ajustaron los medios de fermentación para los microorganismos *Saccharomyces cerevisiae* NRRL Y-2034 y *Zymomonas mobilis* CP4. Se caracterizó la cáscara de banano, la cual posee un contenido de almidón, celulosa y hemicelulosa que representan más del 80 % de la cáscara ameritando el estudio de ésta como fuente de carbono. La hidrólisis ácida de cascara de banano produce 20 g/l de azúcares reductores.

En Quintero (2006), el proyecto va encaminado a la búsqueda de un cultivo energético como alternativa para la producción de combustibles en Colombia, a partir de la Remolacha. Está conformado por dos componentes: agronómico y biotecnológico. El primero, contempla el estudio de adaptabilidad y producción de una variedad de remolacha (*Beta Vulgaris L.*); y el segundo la obtención de bioetanol carburante a través de procesos Biotecnológicos, de la variedad adaptada en planta piloto existente en la sede del programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad Autónoma de Colombia.

Afanador (2005) describe el estado del conocimiento sobre la producción de alcohol anhidro a partir de banano de rechazo mediante un análisis comparativo de los estudios sobre el aprovechamiento de esta fruta en el Urabá antioqueño desde la década de 1980 hasta la actualidad. Contempla su disponibilidad como materia prima, su composición química, los procesos fisicoquímicos de transformación del banano en alcohol anhidro y los impactos ambientales potenciales de esta industria. Concluyendo que La adsorción y la pervaporación son las tecnologías que han demostrado mejores resultados en cuanto a eficiencia técnica y que una de las que merece un campo amplio de investigación es la bioadsorción, puesto que el insumo principal para fabricar bioadsorbentes está disponible cuando se tienen residuos agrícolas de diversa índole.

Zapata (2010) estudió la producción en continuo de etanol a partir de banano de rechazo utilizando células inmovilizadas en alginato de sodio. Compararon las fermentaciones en batch con células libres e inmovilizadas (*Saccharomyces cerevisiae*), utilizando medio estándar de fermentación y mosto de banano como sustrato. Encontraron que las fermentaciones con mosto de banano presentaron un incremento del 31% en la producción de etanol durante las primeras 14 horas de fermentación, pasando de producir 33.78g/L de alcohol con células libres a 44.18g/L con células inmovilizadas.

Guevara (2112) desarrollaron un proceso fermentativo mediante hidrólisis endógena inducida para producir etanol a partir de banano verde de rechazo. El potencial de las vinazas también fue evaluado para obtener biogás. Compararon la hidrólisis endógena inducida con la hidrólisis exógena usando enzimas comerciales, y la hidrólisis ácida tomando como punto de referencia el etanol producido en la fermentación. Con la hidrólisis endógena obtuvieron mayores rendimientos y con esa metodología realizaron fermentaciones a 15 litros. Los rendimientos de etanol en promedio fueron 0.065 litros por kilogramo de banano verde y los del biogás fueron 2.24 litros por litro de vinaza. Concluyeron que el proceso propuesto presenta rendimientos comparables con los de la fermentación de caña de azúcar y que presenta ventajas como su bajo costo, fácil operación y ser una alternativa de solución ambientalmente compatible en el área del manejo de residuos de cosecha. Sánchez (2011) evaluaron la hidrólisis ácida de la celulosa presente en la cascara de banano y su fermentación a etanol, caracterizaron la cascara de banano, la cual posee un contenido de almidón, celulosa y hemicelulosa que representan más del 80% de la cascara logrando esto que sea ameritada para el estudio de estas como fuente de carbono. La hidrólisis ácida produce 40g/L de azúcares reductores. Para la fermentación con levadura lograron una concentración de etanol de 14% apreciándose una producción considerable de etanol.

2.5.2 Banano

Pertenece a la familia de las Musáceas, tiene su origen en Asia meridional, siendo conocido en el Mediterráneo desde el año 650 d.C, es el cuarto cultivo de frutas más importante del mundo, su peso oscila en torno a los 100-120 gramos. La piel puede ser de color amarillo verdoso, amarillo y amarillo-rojizo. Existe un gran número de variedades de cultivo en Oriente; cada región tiene sus propias variedades adaptadas a las condiciones climáticas locales; sin embargo, las variedades introducidas en los trópicos americanos son mucho más limitadas (Monsalve, J. et al, 2006). En la tabla

2 se puede observar los resultados de los análisis que Afanador 2005 le hizo unas muestras de pulpa y cáscara de banano.

Tabla 2. Análisis de banano verde: pulpa y cáscara (% base húmeda)

	Pulpa	Cáscara	Banano sin pelar
Proporción en peso	57.0	43.0	-
Humedad	73.3	91.0	81.0
Azucares reductores	0.16	0.24	0.19
Sacarosa	2.1	2.0	2.06
Polisacáridos fácilmente hidrolizables	26.6	6.64	17.9
Almidón	20.3	3.64	13.1

Fuente: Afanador (2005).

En la tabla 3 se observa que el banano tiene alto contenido de almidón y celulosa, por ello se le considera como una materia prima potencial para la industria del bioetanol.

Tabla 3. Análisis bromatológico banano verde cavendish valery.

	%
Humedad	80.90
Materia seca	19.10
Almidón	No disponible
Cenizas	5.80
Extracto etéreo	1.73
Proteína bruta	5.87
Fibra cruda	4.20
Extracto libre de nitrógeno	82.40
Fósforo (P)	0.09
Calcio (Ca)	0.14
Potasio (K)	2.31
Sodio (Na)	No disponible
Cinc (Zn)	27 mg/L

Fuente: Montes y Torres 2004

El proceso tradicional de producción de alcohol a partir de almidones y celulosa contempla procesos químicos o biológicos (hidrólisis) para su conversión a jarabes azucarados, que una vez acondicionados se someten a la acción de levaduras que efectúan la fermentación alcohólica (Montes y Torres 2004).

2.5.3 Hidrólisis

Las celulosas no pueden ser fermentadas directamente, es necesario convertirla en azúcares más sencillos para su conversión en alcohol.

La hidrólisis es un proceso químico que divide la molécula de celulosa por la acción de la molécula de agua. Las complejas estructuras de la celulosa (celulosa, hemicelulosa y lignina) son divididas en diferentes procesos para conseguir una solución azucarada, y eliminar productos de descomposición de los azúcares que pueden inhibir o, al menos, dificultar el proceso de fermentación. Principalmente se realizan procesos de hidrólisis de ácidos concentrados y bajas temperaturas, de ácidos diluidos y altas temperaturas y enzimáticos (Montes, N. y Torres, L. 2004).

Comprende tres etapas sucesivas cuando se trata de materiales amiláceos: gelatinización, licuefacción y sacarificación. La primera consiste en un calentamiento progresivo de la suspensión de almidón para romper puentes de hidrógeno de las regiones cristalinas y conseguir un hinchamiento de los gránulos de almidón por absorción de agua, estado en el que se tornan susceptibles al ataque mecánico, químico y biológico.

En la licuefacción se efectúa una hidrólisis parcial para disminuir el grado de polimerización y obtener equivalentes de dextrosa entre 10 y 12 unidades. Finalmente, en la sacarificación, se completa la hidrólisis en aras de obtener un jarabe de glucosa (Cruz, k. et al, 2004).

2.5.4 Fermentación

La fermentación alcohólica es la transformación de sustratos azucarados por la acción de microorganismos, que durante su ciclo de vida consumen el sustrato y fabrican etanol y otros compuestos bioquímicos, como resultado de su metabolismo (Austin, 1996).

Desde inicios del siglo pasado, la fermentación, en el marco del proceso de producción de alcohol combustible, se ha realizado mediante procesos por lotes; sin embargo, nuevas técnicas como la fermentación continua y la recirculación de células muestran ventajas en los costos operativos y de inversión (Leveau, J.; Bouix M., 2000).

Algunos métodos para mejorar la eficiencia de la fermentación continua incluyen la centrifugación mecánica y la inmovilización de células en polímeros gelificados, que favorecen la recirculación de una biomasa concentrada y la salida de un caldo alcohólico relativamente limpio (Leveau, J.; Bouix M., 2000).

Otro método es la floculación de los microorganismos y posterior recirculación de los que sedimenten; usando cepas con alta calidad fermentativa y de floculación v.g. *Saccharomyces uvarum*, se aminora el tiempo de producción de etanol y las pérdidas por evaporación (Leveau, J.; Bouix M., 2000).

La levadura utilizada tradicionalmente en fermentación alcohólica ha sido la *Sacharomyces cerevisiae*, sin embargo, los avances en biotecnología han permitido reconocer otros microorganismos con facultades similares como la *Zymomonas mobilis* (Leveau, J.; Bouix M., 2000).

Principales M.O. Productores de Etanol

Bacterias:

- *Zymomonas mobilis*
- *Clostridium acetobutylicum*

- *Klebsiella oxytoca*
- *Escherichia coli*

Levaduras:

- *Saccharomyces cerevisiae*
- *Pichia stipitis*
- *Pachysolen tannophilus*
- *Candida shehate* (Producción de bioetanol 2008)

2.5.5 Destilación

El alcohol producido por destilación contiene una parte significativa de agua, que debe ser eliminada para su uso como combustible. Para ello se utiliza un proceso de destilación. Dado que el etanol tiene un punto de ebullición menor (78,3°C) que el agua (100°C), la mezcla se calienta hasta que el alcohol se evapore y se pueda separar por condensación de éste (Martínez, A.; Lopera, L. (2003).

Existen diversas alternativas para la separación y purificación del etanol, pero convencionalmente el camino elegido para producir alcohol puro ha consistido en dos etapas consecutivas, la destilación convencional y la azeotrópica.

En la primera, el etanol alcanza una concentración máxima de 95,57°GL, punto en el que se forma el azeótropo alcohol-agua; y en la segunda éste se rompe para separar los dos componentes y así obtener el etanol deshidratado (Ramil y Valverde 2002).

La destilación extractiva es la más parecida a la destilación convencional, difiere de ella en que los solventes utilizados no son peligrosos (v.g. glicerina, etilenglicol y propilenglicol) y evitan que el producto final se contamine. El propilenglicol ha sido un agente ideal, ya que en cualquier concentraciógm es miscible en agua, su punto de ebullición es superior al de ésta y no forma azeótropo con ella (Ramil y Valverde, 2002).

2.6 USOS

Los principales objetivos de la producción de bioetanol Son:

- Preparar mezclas con gasolina en lugar de otros aditivos como el ETBE (Etil terbutil éter) o el MTBE (Metil terbutil éter) en proporciones superiores al 5%.
- Usarlo como carburante en mezclas con gasolina hasta un 85%.
- Suministrarlo como materia prima en la producción del ETBE (Producción de bioetanol 2008).

El uso de los alcoholes como combustible no es completamente desconocido, pero hasta hace poco no ha sido utilizado más que en pequeñas aplicaciones prácticas como en iluminación. Para empezar a usarlo en gran escala sería necesario que se diera una rara combinación de altos precios del petróleo a la vez que una caída de los precios de la materia prima empleada para la obtención del bioetanol (García C. et al, 2006).

Los países pioneros son Brasil y Estados Unidos en donde el bioetanol se puede usar sólo o mezclado con gasolina dependiendo de su pureza, así cuando está puro 99,5%, se puede mezclar sin modificaciones en el motor, si está impuro de 95-96% se utiliza en solitario y es preciso realizar modificaciones de cierta importancia al motor (Baur, B. et al, 1996).

España es el primer consumidor europeo de bioetanol que se añade desde hace años a la gasolina en forma de ETBE, la utilización de etanol en mezclas directas, aunque es técnicamente posible, presenta dificultades como aumento de volatilidad, avidez por el agua, y poder disolvente. Además, la implantación en el mercado de mezclas bioetanol-gasolina exige la adaptación de normativa nacional y comunitaria (Masera C., O. 2006).

Se estima que para el año 2030 un cuarto de los combustibles empleados en el transporte provendrán de biocombustibles. El desarrollo de los biocombustibles actuará como tractor y servirá para crear oportunidades y

puestos de trabajo en sectores como el de los suministradores de biomasa, productores de biocombustibles y en el sector de la automoción (MacLean H., Lave L., 2003).

A medio plazo se prevé un amplio desarrollo de los biocombustibles y para lograrlo es necesario dedicar recursos para la mejora de las tecnologías existentes, investigar y desarrollar a nivel comercial los llamados biocombustibles de segunda generación a partir de biomasa lignocelulósica y, por último invertir en el desarrollo de biorefinerías integradas a nivel industrial (MacLean H., Lave L., 2003).

2.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

2.7.1 Ventajas

Con los subproductos se puede alimentar al ganado, con lo que se podría ahorrar una cantidad sustancial de otro tipo de alimento.

"Un incremento del valor energético por unidad de volumen de mezcla, combustión más completa, menores residuos en general" (Aceites y alcoholes. Biocombustibles líquidos).

"Una planta de bioetanol es capaz de crear puestos de trabajo en las áreas rurales, mejores prestaciones globales y mejor distribución de la riqueza, aparte de las ventajas ambientales, económicas y de infraestructura. (Aceites y alcoholes. Biocombustibles líquidos).

Proporciona fuente de energía renovable, se podrían reducir los excedentes agrícolas, se mejora aprovechamiento de tierras de poco valor agrícola y la competitividad al no tener que importar fuentes de energía tradicionales (Nuñez, 2006).

Los efectos medioambientales del uso del bioetanol en comparación con la utilización de gasolinas convencionales son la reducción neta de emisiones de CO₂, variación no relevante de las emisiones de escape de los vehículos, debido a la mayor volatilidad, ligero aumento de las emisiones de hidrocarburos por evaporación que tenderá a desaparecer con la renovación del parque automovilístico (García C. et al, 2006).

2.7.2 Desventajas

El costo de producción casi dobla al de la gasolina.

Se necesitan grandes espacios de cultivo.

Potenciación de monocultivos intensivos (uso de pesticidas y herbicidas).

El combustible precisa de una transformación previa compleja.

Su uso se limita a un tipo de motor de bajo rendimiento y poca potencia (Nuñez 2006).

"La materia prima es de baja densidad energética lo que quiere decir que ocupa mucho volumen y por lo tanto puede tener problemas de transporte y almacenamiento" (Definición de biomasa).

En los países desarrollados se ve una gran desventaja directa sobre el sector alimentario; ya que grandes zonas de cultivos tradicionales han sido utilizadas para cultivos de biocombustibles impulsando la competencia entre productos destinados a la alimentación y la producción de biodiesel, y por lo tanto el costo de los productos alimenticios se ha incrementado (Masera C. et, al. 2006).

2.8 IMPACTO AMBIENTAL

Entre los impactos que produce en el ambiente se incluyen los efectos contrarios producidos por los cultivos intensivos, la polución debida a los procesos de fermentación, el impacto directo por el transporte y almacenamiento y otros. Muchos de estos efectos se pueden disminuir

mediante un diseño más sensible, una localización apropiada y la correspondiente investigación en medida y precaución de la polución.

Con el 10% en volumen de etanol en la gasolina, se reducirá hasta 1.6 millones de toneladas de CO₂ por año para una producción de 300 Kl por día de etanol (Masera C. et, al. 2006).

2.9 HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

2.9.1 Formulación de la Hipótesis

Criterio: Se plantean dos hipótesis bajo el criterio de la “pertinencia” ya que aclaran la necesidad de abordar del problema.

Ho: El banano de desecho no contribuye al aprovechamiento de los residuos al usarse en el proceso de obtención de bioetanol.

Hi: El banano de desecho contribuye al aprovechamiento de los residuos al usarse en el proceso de obtención de bioetanol.

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Se trata de una investigación de tipo experimental ya que se espera caracterizar el objeto en estudio señalando sus características y propiedades, y de tipo comparativo ya que se establecerá más de un de tratamiento en la investigación y se compararán entre si las respuestas a los diferentes tratamientos.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

Se tiene acceso a los bananos de rechazo del campo experimental de Augura ubicada en km 1 via Apartadó – Carepa, Tulenapa. Se toman muestras representativas del material de desecho.

3.3. DISEÑO DEL PROCEDIMIENTO

Una vez se han realizado pruebas de campo y se han estudiado las consideraciones que inciden en el proceso se procede a estandarizarlo bajo los siguientes parámetros (Fonseca, 2011):

- Descripción del proceso, que comprende la relación de las operaciones y procesos Unitarios, que tienen lugar, para desarrollar con ello la elaboración de los diagramas de flujo.
- Relación de equipos y materia prima.
- Cronogramas de operaciones (etapas y procesos), equipos, mano de obra y servicios industriales para la representación gráfica de las diversas etapas, equipos empleados y proceso general, en función del tiempo transcurrido.
- Cronograma de Variables o representación gráfica de las variables que se cambian durante el proceso, en función del tiempo transcurrido, y

- Hojas de Proceso y P&ID, en la cuales se registran las etapas y operaciones así como las variables y tiempos transcurridos. (Fonseca, 2011)

4. RESULTADOS

Se realizaron 4 pruebas de campo con diferentes grados brix, el desarrollo analítico y experimental se efectúa en las instalaciones del Laboratorio de Aguas de CORPOURABA acreditado por el IDEAM desde 2006.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO (CAMPO)

- **Muestreo:** El banano de rechazo se toma del campo experimental de Augura ubicada en km 1 via Apartadó – Carepa, Tulenapa. La recolección se realiza manualmente, esta es simple e involucra equipamiento mínimo, se tuvo en cuenta el mejor tipo de banano de descarte disponible para el muestreo.
- **Preparación de la muestra:** Previamente se deja madurar la muestra sin que llegue a descomponerse, se adiciona agua potable para obtener un jugo, se establece el volumen de trabajo, se agrega la levadura, se agrega azúcar hasta llegar al grado brix de interés midiéndolo con un densímetro de vidrio y homogenizando con una licuadora, se regula el pH con ácido orto-fosfórico 85% hasta el intervalo 4.5 – 5 y se lleva al respectivo biorreactor.
- **Fermentación:** La hidrólisis enzimática de la celulosa se llevó a cabo con enzimas celulasas, catalizadores altamente específicos. La hidrólisis se llevó a cabo bajo condiciones suaves (temperatura entre 20°C y 24°C, proceso anaerobio), esta etapa tiene una duración de 10 días, en los cuáles el control de la temperatura debe ser estricto (para ese fin se utilizaron pilas de hielo y termómetro de vidrio).
- **Descube y destilación:** Pasado el tiempo, el fermentado se deja dos días en una nevera a 4°C, luego se cuela para separar sólidos, al líquido se le mide pH y grados brix nuevamente; en el proceso de destilación se regula la temperatura del destilado a 98°C y se recoge en un recipiente dentro de un baño maría a 4°C para evitar pérdidas, esta etapa dura 4 horas.

- **Identificación del producto:** Luego de recoger el destilado, se le mide el volumen, el pH y la densidad, de esta manera se calcula el % de bioetanol obtenido.

4.2. RELACIÓN DE EQUIPOS Y MATERIA PRIMA (CAMPO)

Materiales del proceso:

- Licuadora, nevera.
- Densímetros de vidrio.
- Colador, pilas de hielo y termómetro de vidrio.
- Plancha de calentamiento IKA RH-KT/C.
- Equipo de destilación de vidrio de 2 L.
- Beakers de 1000 mL, Probetas de 50 mL.
- Balanza analítica Sauter SM 1600.
- Balanza analítica Precisa 240A.
- pHmetro Metrohm 781.
- Biorreactores.

Materias primas:

- Banano de rechazo.
- Levadura *Sacharomuces cerevisae*.
- Azúcar y agua potable.

Servicios requeridos:

- Energía eléctrica, agua potable.

Tabla 4. Resultados Experimentales (campo).

Datos de preparación del mosto						
	Gramos Banano	Gramos Levadura	Densidad	PH	Temperatura (°C)	Grados BRIX Corregidos
Ensayo 1	171,53	1,0626	1,065	4,899	28,3	14,91
Ensayo 2	135,28	1,0775	1,100	4,603	27,7	24,23
Ensayo 3	195,00	1,0280	1,075	4,847	29,5	17,79
Ensayo 4	128,58	1,0314	1,085	4,869	30,2	20,39
Datos después de 10 días de fermentación						
			Densidad	PH	Temperatura (°C)	Volumen a destilar (mL)
		Ensayo 1	1,060	3,458	21,2	925
		Ensayo 2	1,200	3,284	23,6	860
		Ensayo 3	1,100	3,127	24,2	660
		Ensayo 4	1,300	3,111	23,9	900
Datos después de la destilación						
	Densidad	PH	Temperatura (°C)	Volumen destilado (mL)	Tiempo de destilado (h)	Alcohol Probable (%P)
Ensayo 1	0,985	3,291	25,4	146	4	8
Ensayo 2	0,965	3,041	23,6	67	4	21
Ensayo 3	0,980	3,005	26,4	42	4	12
Ensayo 4	0,975	3,143	22,8	105	4	16

Tabla 5. Balance de materiales (campo).

ENSAYO 1			ENSAYO 2		
Entrada	Unidades	Cantidad	Entrada	Unidades	Cantidad
Volumen	Litro	0,925	Volumen	Litro	0,860
Banano	gramos	171,53	Banano	gramos	135,28
Levadura	gramos	1,0626	Levadura	gramos	1,0775
Grado Brix	°Bx	14,91	Grado Brix	°Bx	24,23
Salida	Unidades	Cantidad	Salida	Unidades	Cantidad
Volumen	Litro	0,146	Volumen	Litro	0,067
Bioetanol	%(P)	8	Bioetanol	%(P)	21

ENSAYO 3			ENSAYO 4		
Entrada	Unidades	Cantidad	Entrada	Unidades	Cantidad
Volumen	Litro	0,660	Volumen	Litro	0,900
Banano	gramos	195,00	Banano	gramos	128,58
Levadura	gramos	1,0280	Levadura	gramos	1,0314
Grado Brix	°Bx	17,79	Grado Brix	°Bx	20,39
Salida	Unidades	Cantidad	Salida	Unidades	Cantidad
Volumen	Litro	0,042	Volumen	Litro	0,105
Bioetanol	%(P)	12	Bioetanol	%(P)	16

Gráfica 3. Proceso de fermentación.



Gráfica 4. Relación de volúmenes.



4.3. CRONOGRAMA DE OPERACIONES (CAMPO)

Tabla 6. Cronograma de operaciones (campo).

CRONOGRAMA DE OPERACIONES									
OPERACIONES					TIEMPO				
Tiempo (minutos/Horas/Días)					Minutos			Horas	
					5	15	30	1	3
								Días	
								1	2
								10	
Muestreo									
Recolección manual									
Preparación de la muestra									
Grado Brix y licuado									
pH regulado 4.5 - 5									
Fermentación									
Temperatura entre 20°C y 24°C, proceso anaerobio									
Descube									
Destilación e identificación del producto									
Destilado a 98°C									
Medición de parámetros									

4.4. CRONOGRAMA DE VARIABLES (CAMPO)

Tabla 7. Cronograma de variables (campo).

CRONOGRAMA DE VARIABLES			
VARIABLES DE ENTRADA	Unidades	Cantidad	Tiempo
Masa ensayo 1	gramos	171,53	15 minutos
Masa ensayo 2	gramos	135,28	15 minutos
Masa ensayo 3	gramos	195,00	15 minutos
Masa ensayo 4	gramos	128,58	15 minutos
°Bx Ensayo 1	°Bx	14,91	30 minutos
°Bx Ensayo 2	°Bx	24,23	30 minutos
°Bx Ensayo 3	°Bx	17,79	30 minutos

°Bx Ensayo 4	°Bx	20,39	30 minutos
Volumen a destilar ensayo 1	Litros	0,925	N.A
Volumen a destilar ensayo 2	Litros	0,860	N.A
Volumen a destilar ensayo 3	Litros	0,660	N.A
Volumen a destilar ensayo 4	Litros	0,900	N.A
VARIABLES DE SALIDA	Unidades	Cantidad	Tiempo
Volumen destilado ensayo 1	Litros	0,146	4 Horas
Volumen destilado ensayo 2	Litros	0,067	4 Horas
Volumen destilado ensayo 3	Litros	0,042	4 Horas
Volumen destilado ensayo 4	Litros	0,105	4 Horas
%(P) Bioetanol ensayo 1	% (P)	8	4 Horas
%(P) Bioetanol ensayo 2	% (P)	21	4 Horas
%(P) Bioetanol ensayo 3	% (P)	12	4 Horas
%(P) Bioetanol ensayo 4	% (P)	16	4 Horas

Variables críticas: Para realizar los análisis de varianza observamos que las respuestas significativas se deben principalmente a valor de los °Brix y el volumen a destilar.

Tabla 8. Variables críticas.

X1	X2	Y1	Y2
°Brix	Volumen a Destilar (L)	Volumen Destilado (L)	%(P) Bioetanol
14,91	0,925	0,146	8
24,23	0,860	0,067	21
17,79	0,660	0,042	12
20,39	0,900	0,105	16

Para el análisis estadístico del %(P) Bioetanol (Y2), utilizando la herramienta de Excel “análisis de datos” en regresión, obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 9. Estadísticas de la regresión Y2.

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,99956657
Coeficiente de determinación R ²	0,999133327
R ² ajustado	0,997399982
Error típico	0,283520538
Observaciones	4

Criterio: Se plantean dos hipótesis bajo el criterio de la “pertinencia” ya que aclaran la necesidad de abordar del problema.

Hi1: Los °Brix aportan significativamente al %(P) de bioetanol obtenido.

Hi2: El volumen a destilar aporta significativamente al %(P) de bioetanol obtenido.

Tabla 10. Anova Y2.

ANÁLISIS DE VARIANZA								
		<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>		
Regresión		2	92,6696161	46,33480805	576,4190425	0,029439306		
Residuos		1	0,080383895	0,080383895				
Total		3	92,75					

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
*1	-13,3479	1,3683557	-9,754727	0,06503	-30,7345	4,03867	-30,7345	4,03867
*2	1,402661	0,0413776	33,89902	0,018774	0,876908	1,92841	0,87690	1,928414
*3	0,579361	1,3596252	0,426118	0,743558	-16,6963	17,8550	-16,6963	17,85503

*1 Intercepción, *2 ° Brix y *3 Volumen a Destilar

Tabla 11. Análisis de residuales Y2.

Análisis de los residuales				Resultados de datos de probabilidad	
<i>Observación</i>	<i>Pronóstico %(P) Bioetanol</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>	<i>Percentil</i>	<i>%(P) Bioetanol</i>
1	8,101654406	-0,101654406	-0,621015314	12,5	8
2	21,1368013	-0,136801298	-0,835730632	37,5	12
3	11,98778878	0,012211216	0,074599343	62,5	16
4	15,77375551	0,226244488	1,382146602	87,5	21

Debido a que $F > 0.029$ y el valor del estadístico t correspondiente a los °Brix son los únicos mayores que al de la probabilidad ($33,899 > 0,0187$), se considera que el nivel de los resultados son estadísticamente significativos y representativos, además los valores de los coeficientes sugieren que los °Brix influyen casi 3 veces más en la obtención de bioetanol que el volumen a destilar, por lo tanto se acepta la hipótesis H_{i1} .

Para el análisis estadístico del volumen destilado (Y1), utilizando la herramienta de Excel “análisis de datos” en regresión, obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 12. Estadísticas de la regresión Y1.

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,999931425
Coeficiente de determinación R^2	0,999862855
R^2 ajustado	0,999588566
Error típico	0,000921669
Observaciones	4

Criterio: Se plantean dos hipótesis bajo el criterio de la “pertinencia” ya que aclaran la necesidad de abordar del problema.

H_{i1} : Los °Brix aportan significativamente al volumen destilado obtenido.

Hi2: El volumen a destilar aporta significativamente al volumen destilado obtenido.

Tabla 13. Anova Y1.

ANÁLISIS DE VARIANZA								
		Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F		
Regresión		2	0,006193151	0,003096575	3645,28	0,011710876		
Residuos		1	8,49474E-07	8,49474E-07				
Total		3	0,006194					

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
*1	-0,06355	0,004448	-14,2876	0,044484	-0,12007	-0,00703	-0,1200	-0,0070
*2	-0,00618	0,000134	-45,9905	0,013840	-0,00789	-0,00447	-0,0078	-0,0044
*3	0,326618	0,004419	73,89768	0,008614	0,270458	0,382778	0,27045	0,3827

*1 Intercepción, *2 °Brix y *3 Volumen a Destilar

Tabla 14. Análisis de residuales Y1.

Análisis de los residuales					Resultados de datos de probabilidad	
Observación	Pronóstico Volumen Destilado	Residuos	Residuos estándares	Percentil	Volumen Destilado	
1	0,146330458	-0,00033045	-0,62101531	12,5	0,042	
2	0,067444714	-0,00044471	-0,83573063	37,5	0,067	
3	0,041960304	3,96962E-05	0,074599343	62,5	0,105	
4	0,104264524	0,000735476	1,382146602	87,5	0,146	

Debido a que $F > 0.0117$ y el valor del estadístico t correspondiente a el volumen a destilar son los únicos mayores que al de la probabilidad ($73,89 > 0,0086$), se considera que el nivel de los resultados son estadísticamente significativos y representativos, además los valores de los coeficientes sugieren que el volumen a destilar es el único que influye en el volumen destilado, ya que el de los °Brix es negativo, por lo tanto se acepta la hipótesis Hi2.

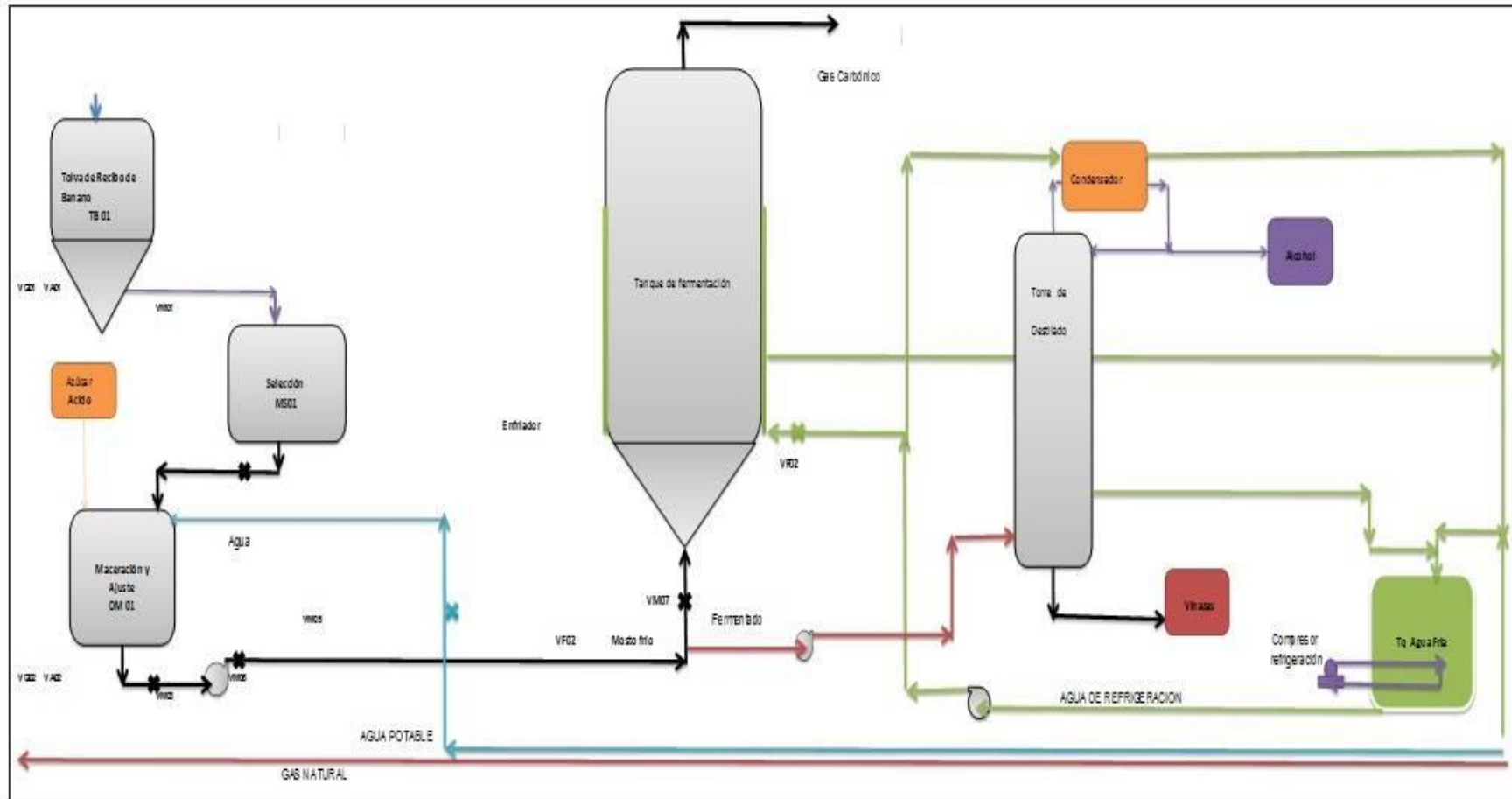
4.5. ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO

4.5.1. Diagramas de flujo

Concordante a la descripción del proceso se establece el siguiente diagrama de flujo.

Gráfica 5. P&ID.

DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA ELABORACIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DEL BANANO



Gráfica 6. Diagrama elemental del proceso.



El proceso inicia con la adecuación del banano de rechazo maduro y termina en la misma destilación del bioetanol empleando los siguientes equipos:

Tabla 15. Equipos.

ETAPA	EQUIPO	MATERIAL	CARACTERISTICAS
RECEPCIÓN			
	Tolva de recibo	Acero inoxidable.	Rectangular, fondo piramidal
	Banda Transportadora	Acero inoxidable y lona.	De banda y rodillo
	Mesa para selección	Acero inoxidable.	Rectangular
	Tolva de recibo	Acero inoxidable.	Rectangular, fondo piramidal
ADECUACIÓN	Peladora	Acero inoxidable.	
	Despulpadora o Molino	Acero inoxidable.	
MACERACION Y AJUSTE	Tanque de maceración	Acero inoxidable.	Cilindrico con agitador
	Bomba de agua	Acero inoxidable.	Centrifuga
FERMENTACIÓN	Tanque de fermentación anaerobio (Biorreactor)	Acero inoxiable	Rectangular, fondo piramidal
	Bomba de agua	Acero inoxidable.	Centrifuga
DESTILACIÓN	Condensador	Acero inoxiable	Rectangular
	Tanque vinazas	Acero inoxiable	Rectangular
	Bomba de agua	Acero inoxidable.	Centrifuga
	Tanque Alcohol	Acero inoxiable	Rectangular
	Torre de destilación	Acero inoxiable	Reflujo en el condensado
	Tanque de refrigeración	Acero inoxiable	Rectangular
	Compresor	Acero inoxiable	Centrifuga
SERVICIOS REQUERIDOS			
Energía Eléctrica			
Iluminación			
Vapor de agua			
Aire esteril			
Agua potable			

4.5.2. Balance parcial de materiales para la obtención de bioetanol

Se realiza un balance global de los diferentes procesos, aunque el ensayo 3 está presente, este no participa en los cálculos ya que tiene una base de trabajo

diferente, utilizando los datos de la tabla 4 y el gráfico 3 se calculan promedios y se realizan una simulación a mayor escala.

Tabla 16. Balance parcial global.

ENSAYOS		PRIMERO	SEGUNDO	TERCERO	CUARTO	PROMEDIO	SIMULACIÓN	
Volumen base de trabajo		1 L	1 L	0,6 L	1 L		1000 L	
RECIBO DE MATERIA PRIMA								
	Simbolo	Kilos	Kilos	Kilos	Kilos	kilos	PORCENT.	kilos
ENTRADAS								
Banano verde	Bv	0,23615	0,23844	0,24042	0,23422	0,2363	100,00%	236,27
TOTAL ENTRADAS		0,23615	0,23844	0,24042	0,23422	0,2363	100,00%	236,27
SALIDAS								
Banano Madurado	Bm	0,17153	0,13528	0,19500	0,12858	0,1451	61,43%	145,13
Rechazo (Cáscara)	R	0,06462	0,10316	0,04542	0,10564	0,0911	38,57%	91,14
TOTAL SALIDAS		0,23615	0,23844	0,24042	0,23422	0,2363	100%	236,27
ADECUACIÓN BANANO								
ENTRADAS								
Banano madurado	Bm	0,17153	0,13528	0,19500	0,12858	0,1451	13,40%	145,13
Agua	W	0,80000	0,80000	0,50000	0,80000	0,8000	73,85%	800,00
Azúcar	A	0,09300	0,16422	0,07850	0,15592	0,1377	12,71%	137,71
Acido Ortofosfórico 85%	H ₃ PO ₄	0,00050	0,00050	0,00050	0,00050	0,0005	0,05%	0,50
TOTAL ENTRADAS		1,06503	1,10000	0,77400	1,08500	1,0833	100,00%	1083,34
SALIDAS								
Mosto	Mt	1,05438	1,08900	0,76626	1,07415	1,0725	99,00%	1072,51
Merma	Me	0,0106503	0,011	0,00774	0,01085	0,0108	1,00%	10,83
TOTAL SALIDAS		1,06503	1,10000	0,77400	1,08500	1,0833	100,00%	1083,34
FERMENTACIÓN								
ENTRADAS								
Mosto	Mt	1,05438	1,08900	0,76626	1,07415	1,0725	99,90%	1072,51
Levadura	Le	0,00106	0,00108	0,00103	0,00103	0,0011	0,10%	1,06
TOTAL ENTRADAS		1,05544	1,09008	0,76729	1,07518	1,0736	100,00%	1073,56
SALIDAS								
Fermentado	Fm	0,98050	1,03200	0,72600	1,03000	1,0142	94,47%	1014,16
Levadura y residuos sólidos	Lrs	0,00531	0,00539	0,00514	0,00516	0,0053	0,49%	5,29
Gas carbónico	Gc	0,06963	0,05269	0,03615	0,04002	0,0541	5,04%	54,11
TOTAL SALIDAS		1,05544	1,09008	0,76729	1,07518	1,0736	100,00%	1073,56
DESTILACIÓN								
ENTRADAS								
Fermentado	Fm	0,98050	1,03200	0,72600	1,03000	1,0142	100%	1014,16
TOTAL ENTRADAS		0,98050	1,03200	0,72600	1,03000	1,0142	100%	1014,16
SALIDAS								
Destilado (Agua + Alcohol)	Dt	0,14480	0,06466	0,04116	0,10238	0,1039	9,30%	94,28
Alcohol	Al	0,01188	0,01372	0,00491	0,01602	0,0139	1,24%	12,59
Agua	W	0,13291	0,05093	0,03625	0,08636	0,0901	8,06%	81,69
Vinazas	Vz	0,83571	0,96735	0,68484	0,92763	0,9102	81,41%	825,61
TOTAL SALIDAS		0,98050	1,03200	0,72600	1,03000	1,1181	100,00%	1014,16
% Alcohol Obtenido (%P)								
Volumen Destilado (L)		0,147	0,067	0,042	0,105	0,1063		106,3
Densidad Obtenida Destilado		0,985	0,965	0,980	0,975	0,9750		0,9750
Densidad Obtenida Inicial		1,065	1,100	1,075	1,085	1,0833		1,0833

4.5.3. Cronograma global del proceso.

A continuación se presenta el cronograma de las etapas del proceso.

Tabla 17. Cronograma global del proceso de obtención del bioetanol.

PARA UN DIA DE TRABAJO																			
ETAPA	OPERACIÓN	HORA	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	15,5	16,0
Adecuación de materias	Recepción (transporte)																		
	Selección (separación)																		
	Aseo equipos																		
Maceracion y ajustes	Molienda (reducción de tamaño)																		
	Adición de agua																		
	Adición de azúcar (mezcla)																		
	Bombeo a fermentación																		
	Aseo equipos																		

PARA QUINCE DÍAS DE TRABAJO																																		
ETAPA		OPERACIÓN	DÍAS	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	
Fermentación		Llenado de tanque 1																																
		Fermentación																																
		Vaciado del Tanque																																
		Aseo del Tanque																																
		Llenado de tanque 2																																
		Fermentación																																
		Vaciado del Tanque																																
		Aseo del Tanque																																
		Llenado de tanque 3																																
		Fermentación																																
		Vaciado del Tanque																																
		Aseo del Tanque																																
		Llenado de tanque 4																																
		Fermentación																																
		Vaciado del Tanque																																
		Aseo del Tanque																																
Destilación	Operación																																	

4.5.4. Hoja de proceso.

A continuación se presenta la hoja de proceso.

Tabla 18. Hoja de proceso.

PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIOETANOL DEL RECHAZO DE BANANO

Hoja de proceso N°: _____ Fecha: _____

Alistamiento Materias Primas	Tiempo (Días)		De	Hasta	Flujo
		Acumulado			
Selección/Muestreo	0,5	0,5			
Recepción	0,5	1			
Banano rechazo verde a maduración	4	5			
Tiempo total					

Preparación de la muestra	Tiempo (Días)		De	Hasta	Flujo
		Acumulado			
Grados Brix y licuado	0,5	0,5			
pH regulado de 4,5 - 5	0,5	1			
Tiempo total					

Fermentación anaerobia	Tiempo (Días)		De	Hasta	Flujo
		Acumulado			
Transporte al fermentador	0,1	0,1			
Adición de levadura	0,1	0,2			
Control de temperatura 20°C - 24°C	4,8	5			
Tiempo total					

Destilación	Tiempo (Días)		De	Hasta	Flujo
		Acumulado			
Transporte al destilador	0,1	0,1			
Destilación controlada	0,9	1			
Tiempo total					

Materias Primas	Kg
Banano de rechazo	
Levadura	
Azucar	
Agua	
Total	

Turno	Operario

5. CONCLUSIONES

Tras la realización del análisis para una posible solución al problema planteado, con vistas al logro de una mayor optimización (diseño de una planta de obtención de bioetanol), es posible concluir que:

- Los procesos unitarios necesarios para la obtención del bioetanol a partir del banano de rechazo se consultaron y aplicaron de forma controlada logrando una óptima fermentación.
- Las pruebas de campo se desarrollaron satisfactoriamente capturando una muestra representativa del problema a tratar, además los análisis y ensayos experimentales fueron realizados en un laboratorio acreditado por el IDEAM bajo excelentes condiciones instrumentales y ambientales avalando así el ejercicio analítico.
- El jugo de banano presenta un alto potencial de uso como sustrato en los procesos fermentativos para la producción de alcohol. Con este sustrato se lograron altos rendimientos y una conversión de más del 80% con respecto a los valores teóricos reportados en tablas de conversión °Brix, lo que lo convierte en un sustrato promisorio para las fermentaciones alcohólicas.
- La estandarización se desarrolló de manera satisfactoria utilizando los datos arrojados por el trabajo de campo, se logró la compilación necesaria que se había establecido como requisito para un futuro diseño de una planta de obtención de bioetanol a partir del banano de rechazo.
- Existen en la actualidad más de 300 fincas bananeras en la región las cuales realizan en promedio embarques de 5 días a la semana, y aunque parte de los bananos de rechazo generados se destinan para el consumo interno esto no generaría limitación alguna para la captura de materia prima.
- Como resultado de la investigación presentada es posible concluir que el aprovechamiento del banano de rechazo de la región de Urabá como materia prima en la obtención de bioetanol no solo aporta una solución más al problema de residuos agroindustriales sino que además es una potencial fuente de recursos bioenergéticos, oportunidad laboral y de inversión regional ya que esta biotecnología se viene proyectando a nivel mundial con resultados muy satisfactorios.

6. RECOMENDACIONES

Una vez concluida la tesis, se considera interesante investigar sobre otros aspectos relacionados con el mecanismo utilizado de aprovechamiento del banano y su problemática residual, se propone:

- Realizar otro trabajo de investigación similar utilizando una levadura termo resistente o al menos que no necesite un control de temperatura tan estricto ya que Urabá es una zona cálida tropical, esto podría facilitar el proceso de fermentación.
- Otro subproducto del cultivo de banano es el bagazo, el cuál es rico en material celulósico, tomando como referencia la problemática residual se podría realizar una investigación en el aprovechamiento de dicho residuo fibroso y la calidad de celulosa que se puede obtener.

BIBLIOGRAFÍA

Afanador A. M. (2005). El banano verde de rechazo en la producción de alcohol carburante. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 3 p. 51-68.

Aceites y alcoholes. Biocombustibles líquidos. Disponible en http://www.construmatica.com/construpedia/Aceites_y_Alcoholes._Biocombustibles_L%C3%ADquidos visitado el 02/05/2014.

Alvear M. R., Castillo C. R., Henao D. L., Marimón W., Tejada C. N., Tejada L. P., Villabona A. (2009). Estudio de la hidrólisis ácida de cáscaras de naranja citrus síntesis para la obtención de etanol. Memorias del IV Simposio de Química Aplicada – SIQUIA 2009 p. 1-8.

Aycachi R. (2009). Monografía Produccion de Bioetanol XV Curso de Titulacion. “Producción de bioetanol” disponible en <http://es.scribd.com/doc/177357172/20375393-Monografia-Produccion-de-Bioetanol-XV-Curso-de-Titulacion> visitado el 03/05/2014

Austin, G. T. (1996) Shreve's Chemical Process Industries: Chapter 31 Fermentation Industries. 5th edition. McGraw-Hill, 1994. p. 581-591.

Bastidas T.; Ibarra D.; Serrano S.; Salgado D.; Benítez V. (2010). Aislamiento, selección y preservacion de cepas para la obtencion de bioetanol a partir de residuos de banano, disponible en <http://es.scribd.com/doc/34026364/PROYECTO-banano-NMB> visitado el 02/05/2014.

Baur, B. K.; Jenkins P.E. (1996). Performance analysis of SI engine with ethyl tertiary butylether (ETBE) as a blending component in motor gasoline and comparison with other blending components. Center for Engine Technology. Mechanical Engineering Department. University of Nebraska-Lincoln.

Biocombustibles: Bioetanol y Biodiesel. M^a José Núñez García y Pablo García. Triñanes Dpto de Ingeniería Química, Universidad de Santiago de Compostela
Disponible en http://www.enciga.org/files/boletins/61/resumo_biocombustibles_bioetanol_y_biodiesel.pdf visitado el 02/05/2014.

Biocombustibles. (2008) Disponible en <http://www.miliarium.com/bibliografia/Monografias/Biocombustibles/Bioetanol.asp> visitado el 03/05/20014.

Biocombustibles. (2010) Disponible en <http://www.biocombustibles.cl/site/productos.htm> visitado el 03-05-2014.

Biocombustibles. perspectiva desde el punto de vista de las petroleras. Ingeniería sin fronteras. Disponible en http://www.construmatica.com/construpedia/Biocombustibles._Perspectiva_desde_el_Punto_de_Vista_de_las_Petroleras visitado el 02/05/2014.

Bullock, J. y B. Kristiansen (1998). Biotecnología Básica. Edit. Acribia. Zaragoza.

Castilla Rodríguez Magdalena (2010). Estudio de la separación etanol-agua mediante líquidos iónicos, disponible en [://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/3764/1/tfm229.pdf](http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/3764/1/tfm229.pdf) visitado el 02/05/2014.

Colombia Componente Proyectos Demostrativos Cultivos Seleccionados. Disponible en <http://cep.unep.org/repcar/proyectos-demostrativos/colombia-1/seleccion-de-cultivos-en-colombia> visitado el 02/05/2014.

Cruz, k. S.; Gómez, C.; Otálvaro, B. (2004). Optimización de las condiciones de operación de la hidrólisis enzimática sobre el material lignocelulósico de la planta de banano y su fruto. Universidad Nacional de Colombia, grupo de bioprocesos y flujos reactivos. Medellín, Colombia.

Definición de biomasa. Disponible en <http://renovablesjc.blogspot.com/p/biomasa.html> visitado el 04/05/2014.

Desarrollo regional en Uraba, Colombia, (2011). La materia organica es factor limitante, disponible en [http://www.bio-tec.net/archivos/News /2011/MAYO/PC30-C78%20\(E-news%20Urab%C3%A1%20art%C3%ADculo\)%20Mayo%206-11.pdf](http://www.bio-tec.net/archivos/News /2011/MAYO/PC30-C78%20(E-news%20Urab%C3%A1%20art%C3%ADculo)%20Mayo%206-11.pdf) visitado el 02/05/2014.

Dorado M. P., Ballesteros E., Almeida J.A., Schellet C., Lohrlein H.P., Krause R., 2002. An alkalicatalyzed transesterification process for high free fatty acid oils. Trans. ASAE; 45(3): 525–9.

Fajardo C., E.; Sarmiento F. (2007). Evaluación de Melaza de Caña como Sustrato para la Producción de *Saccharomyces cerevisiae*. Pontificia Universidad Javeriana – Bogotá.

Fonseca, V. (2011). Ingeniería de procesos en las industrias de alimentos y bebidas. Módulo UNAD Estandarización de procesos en la industria de alimentos. Universidad Abierta Distancia, Bogotá.

Fonseca V. V, (2013) Dimensionamiento de equipos y servicios. Unidad 2. (2013) Disponible en http://datateca.unad.edu.co/contenidos/223156/02_Unidad_2_DPA-2013.pdf visitado el 02/05/2014.

Fuentes, A. M. y Bayona, R. (1994). Transformación del desecho vegetal del cultivo del banano en abono natural a través de la lombriz roja californiana en Urabá. S. I., Augura. 17 p.

García C., J.; García L. J. (2006) Biocarburantes Líquidos: Biodiésel y Bioetanol. Informe de Vigilancia Tecnológica. Fundacion para el conocimiento Madrid CEIM.

Góngora Q. M. R. (2011). Estudio de las características espesantes y viscosantes del almidón de banano, comparado con los almidones utilizados comercialmente,

disponible en http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06_3213.pdf, visitado el 02/05/2014.

Guevara, M. J.; Mallén, W. C.; Struck, G. A.; Varela, V. T. (2008). Proyecto Final: Producción de Bioetanol Laboratorio de Procesos de Separación. Disponible en http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.fjartnmusic.com/Personal/8o_Semestre_files/BioEtOH.pdf, visitado el 03/05/2014.

Leveau, J. Y.; Bouix M. (2000). Microbiología Industrial: Los Microorganismos de Interés Industrial. Edit. Acribia. Zaragoza.

López D. E., Woodwin Jr. J. G., Bruce D. A., Lotero E. , 2005. Transesterification of triacetin with methanol on solid acid and base catalysts. *Applied Catalysis A: General* 295: 97-105.

Lopez-Granados M., Mariscal R., 2005. Catalizadores para mejorar el medio ambiente. Instituto de Catálisis y Petroleoquímica.

Martínez J., A. (2008). La biotecnología Moderna en la Generación de Biocombustibles: Combustibles Biológicos Renovables. Instituto de Biotecnología UNAM.

Martínez, A.; Lopera, L. (2003). Evaluación del rendimiento de etanol en una fermentación continua con *Zymomonas mobilis*. Medellín, 114 p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.

Masera C., O. (2006). Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el transporte en Mexico. Secretaría de Energía. pp. 151 – 300.

MacLean H., Lave L., 2003. Evaluating automobile fuel/propulsion system technologies. *Progress in Energy and Combustion Science*, Pergamon (29): 1–69.

Meher L.C., Vidga S., Naik S. N., 2006. Technical aspects of biodiesel production by transesterification – a review. Renewable & Sustainable Energy Reviews, Volume 10, (3): 248-268.

Meriches R. J. (2006). Chile se apresta a aprovechar "boom" de los biocombustibles. Disponible en <http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=16791> visitado el 04-05-2014.

Mohamad I.A.W., Ali O.A., 2002. Evaluation of the transesterification of waste palm oil into biodiesel. Bioresources Technology, (85): 25-256.

Monyem A., Germen J. H., 2001. The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions. Biomass & Bioenergy (20): 317-325

Monsalve, J. Medina, V. Ruiz, A. (2006). Producción de etanol a partir de la cáscara de banano y de almidón de yuca. Universidad Nacional de Colombia. Grupo de Bioprocesos-grupo de combustibles alternativos. Medellín, Colombia.

Montes, N. y Torres, L. (2004). Hidrólisis enzimática de banano verde de rechazo. Medellín, 101p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.

Núñez G., J. y P. García T. (2006). Biocombustibles: Bioetanol y Biodiesel. Universidad Santiago de Compostela.

Producción de Bioetanol. Disponible en [Es.scribd.com/doc/63899405/Producción – de-Bioetanol](https://es.scribd.com/doc/63899405/Producción-de-Bioetanol) visitado el 03/05/2014.

Peralta F R.; Bonnabel J. (2010). Etanol una opción viable de combustible, disponible en http://www.tlalpan.uvmnet.edu/oiiid/download/Etanol%20como%20combustible_04_ING_IMI_PIT_E.pdf visitado el 02/05/2014.

Poniachik K. (2007). Biocombustibles un aporte para la Seguridad Energética. Disponible en www.freewebs.com/eaguilam/fao%20presentacion%20Poniachik.ppt visitado el 03-05-20014.

Quintero Quelbis Román, Villamizar Henry (2006). La remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) como cultivo energético y viable para la producción de bioetanol carburante en la Sabana de Bogotá-Colombia.

Ramil, M. y Valverde, J. L. (2002). Destilación extractiva para obtener etanol anhidro. En: Ingeniería Química. Vol. 34, No 395; p. 132-134.

Saldarriaga, L. C.(1982). Estudio de materia prima y proyecto de planta piloto de alcohol de banano en Urabá. Medellín: Gobernación de Antioquia. 149 p.

Sánchez Kelvin (2011). Obtención de etanol a partir de la cáscara de banano. Universidad del Tolima facultad de ingeniería agronómica programa de ingeniería agroindustrial.

Tejada L. P., Tejada C., Villabona Á., Alvear M. R., Castillo C. R., Henao D. L., Marimón W., Madariaga N., Tarón A. (2010). Producción de bioetanol a partir de la fermentación alcohólica de jarabes glucosados derivados de cáscaras de naranja y piña. Revista Educación en Ingeniería N°. 10 P. p 120-125.

Uyazán, I.D. Gil, J.L. Aguilar, G. Rodríguez, L.A. Caicedo. (2004) Deshidratación del etanol. Revista ingenieros e investigación no. 56, Diciembre de 2004. 49 - 59.

Vázquez, H. J. Y O. Dacosta (2006). Fermentación alcohólica. Una opción para la producción de energía renovable a partir de desechos agrícolas. Universidad Autónoma Metropolitana. FI – UNAM. México.

Velásquez, H. (2010). Análisis energético y exergético del proceso de obtención de etanol a partir de la fruta del banano. Grupo de Investigación en Bioprocesos,

Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Cra 80 N.º 65-223, Medellín, Colombia.

Vicente G., Martínez M. y Aracil J., (1998). Ésteres metílicos como combustible. Materias primas y propiedades, Tecno-Ambiente 85 (10), 9-12.

Vicente G., Martínez M. y Aracil J., 2001. Biodiésel: una alternativa real al gasóleo mineral. Ingeniería Química 377 (3), 135-145.

Zapata A. M.; Peláez C. (.2010) Producción en continuo de etanol a partir de banano de rechazo (cáscara y pulpa) empleando células inmovilizadas. Instituto de Química-Universidad de Antioquia. Revista Tumbaga 5 49-60.

Tumbaga vol, 1 mun. 5 Ciencia en Construcción Facultad de Ciencias. .
Universidad del Tolima.

ANEXOS

(Imágenes de los ensayos de campo)

Imagen 1. Muestreo.



Imagen 2. Preparación de la muestra, pesaje banano.



Imagen 3. Preparación de la muestra, pesaje levadura.



Imagen 4. Preparación de la muestra, licuado.



Imagen 5. Preparación de la muestra, regulación de °Brix.

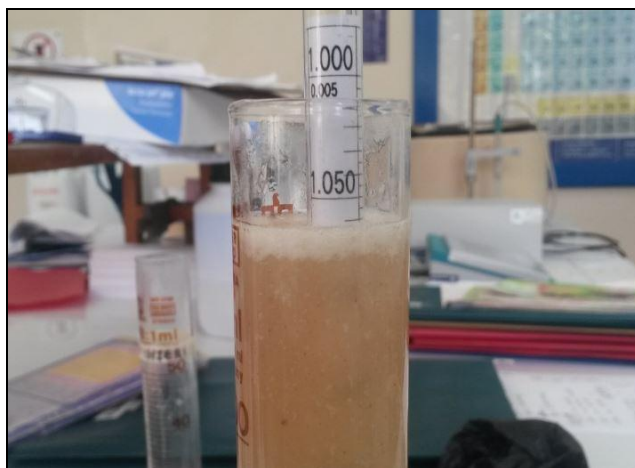


Imagen 6. Preparación de la muestra, regulación de pH.

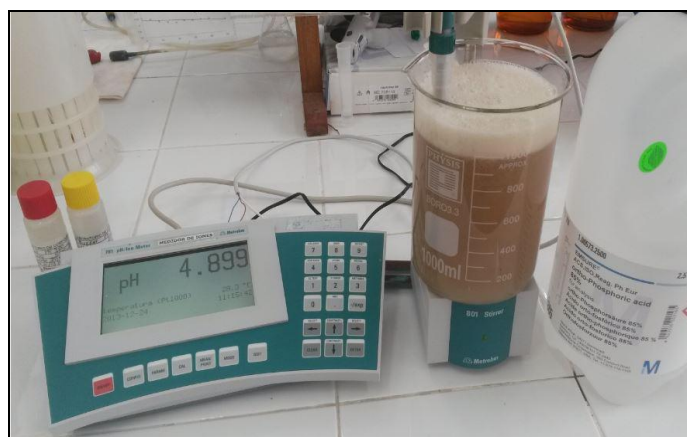


Imagen 7. Preparación de la muestra, biorreactor.



Imagen 8. Fermentación, ambiente.



Imagen 9. Colado.



Imagen 10. Destilación.

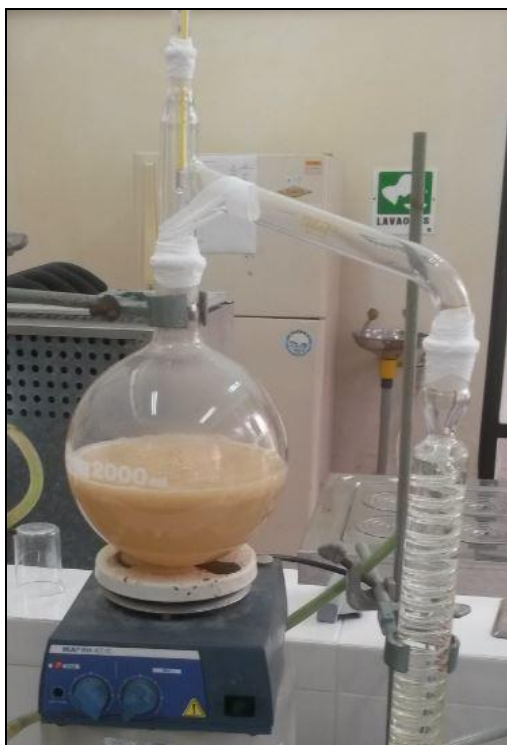


Imagen 11. Identificación del bioetanol.

